



La malédiction X a encore frappé !

Gregor Rauw (ULg)

© JAXA

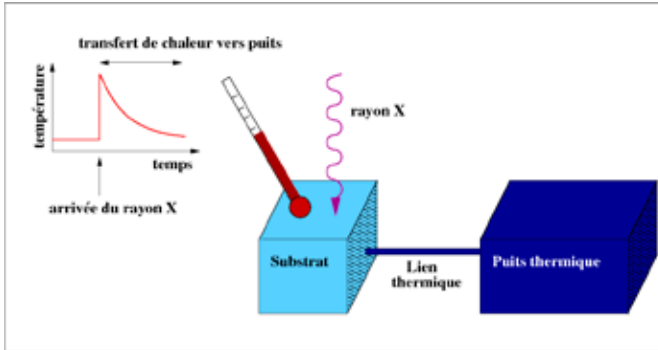
Les superstitieux parleront sans doute d'une malédiction, alors que les esprits rationnels diront que c'est le résultat d'un malheureux concours de circonstances : le 26 mars 2016 l'agence spatiale japonaise (JAXA) a définitivement perdu le contrôle de son satellite scientifique Hitomi (« Pupille » en japonais) qu'elle venait de mettre en orbite autour de la Terre seulement quelques semaines auparavant. Ce genre d'incident arrive (malheureusement) de temps à autre. On se souviendra par exemple de la perte de la mission martienne Phobos-Grunt fin 2011. Alors pourquoi évoquer un mauvais sort dans le cas d'Hitomi ? C'est parce qu'il s'agit en réalité de la troisième tentative de la JAXA d'offrir aux astrophysiciens japonais – et du monde entier – un instrument d'un genre nouveau : un calorimètre à rayons X, permettant aux scientifiques d'étudier les phénomènes les plus énergétiques et les plus violents de l'Univers avec un niveau de détails sans précédent. Hélas, à ce jour, toutes ces tentatives se sont soldées par des échecs !

Une image vaut mieux que mille mots, un spectre vaut mieux que mille images

Pourquoi, au-delà d'une évidente question de fierté nationale, la JAXA s'obstine-t-elle à vouloir réaliser une mission spatiale équipée d'un tel engin ? Pour y répondre, il nous faut d'abord essayer de comprendre les raisons d'être et le fonctionnement d'un calorimètre à rayons X.

En astrophysique, à peu d'exceptions près, toute l'information dont disposent les scientifiques sur les astres vient de l'analyse de la lumière émise par ceux-ci. Alors, afin de tirer un maximum de renseignements, il faut étudier la lumière sur un domaine de longueurs d'onde le plus vaste possible, depuis les ondes radio jusqu'aux rayons gamma, en passant par l'infrarouge, le domaine visible, l'ultra-violet et les rayons X.¹ Grâce aux progrès extraordinaires réalisés avec le satellite européen

1 Le domaine des rayons X est conventionnellement défini comme allant des longueurs d'onde de 0,1 à 100 Å, soit des énergies 50 à 50 000 fois plus élevées que la lumière visible.



Vue schématique du fonctionnement d'un calorimètre X. L'absorption d'un rayon X par le substrat génère une augmentation temporaire de la température de celui-ci. La mesure précise de cette augmentation permet de connaître l'énergie du rayon X incident.

XMM-Newton et son alter ego américain Chandra, l'étude des rayons X émis par toutes sortes de sources cosmiques fait maintenant partie du quotidien des astrophysiciens. Ce domaine nous révèle les phénomènes violents (tels que la destruction par l'effet de marée d'étoiles qui s'aventurent trop près d'un gigantesque trou noir) et énergétiques (impliquant des quantités colossales de gaz à des températures de plusieurs dizaines de millions de degrés). La majorité de ces phénomènes ne peuvent pas, ou seulement difficilement, être étudiés à d'autres longueurs d'onde. Les rayons X fournissent donc aux scientifiques un outil précieux pour approfondir leur compréhension de l'Univers.

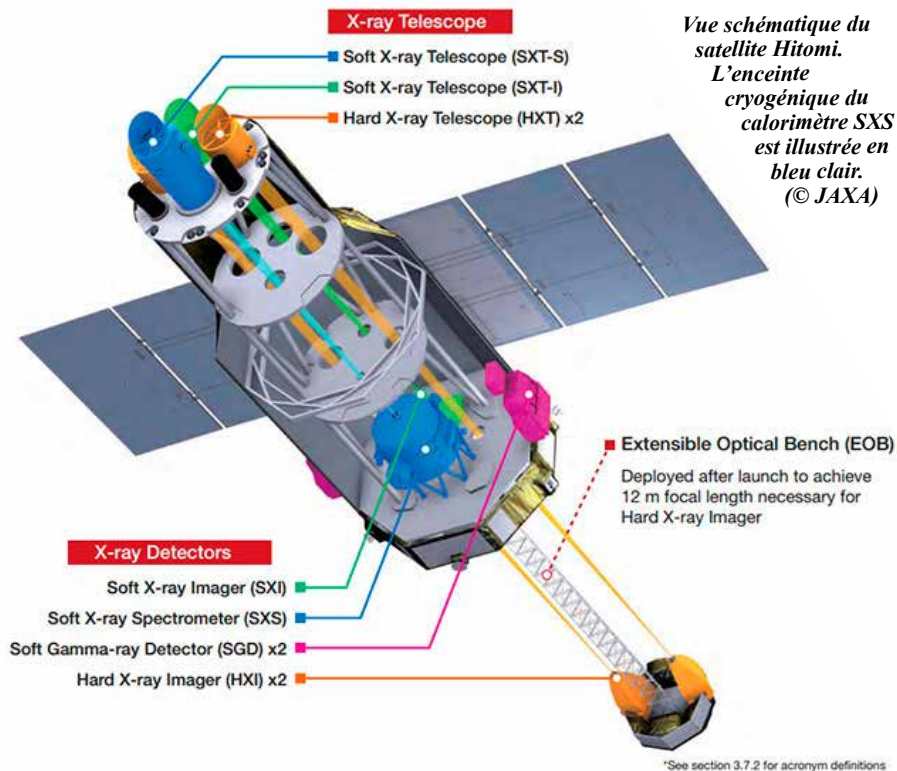
Pour tirer un maximum de renseignements des rayons X émis par les sources cosmiques, les scientifiques ne se contentent pas d'enregistrer l'arrivée des rayons X sur un détecteur mais ils vont plus loin en déterminant l'énergie des rayons reçus. Cette façon de faire, qu'on appelle la spectroscopie, permet de sonder les propriétés physiques (température, pression, champs magnétiques, présence de particules relativistes se déplaçant à plus de 95% de la vitesse de la lumière,...) au sein de la source. Pour réaliser le spectre d'une source X, il existe différentes techniques. Ainsi, on peut par exemple utiliser le fait que le détecteur (un CCD amélioré) lui-même peut grossièrement² distinguer un rayon X plus

énergétique d'un rayon X moins énergétique, grâce au fait que le rayon X, enregistré individuellement, crée un nuage d'électrons plus ou moins fourni en fonction de son énergie. C'est la technique utilisée par exemple par les instruments EPIC à bord de XMM-Newton et ACIS à bord de Chandra. On peut aussi utiliser un réseau afin d'envoyer les rayons X sur des régions différentes du détecteur en fonction de leur énergie. Cette technique permet de révéler nettement plus de détails que la précédente, mais ne peut s'appliquer qu'à des sources ponctuelles brillantes (par exemple une étoile ou un lointain noyau de galaxie active)! Cette approche, utilisée par les instruments RGS à bord de XMM-Newton, ainsi que les HETG et LETG à bord de Chandra, ne permet d'étudier que les rayons X de relativement faible énergie et avec un pouvoir de résolution limité à environ 1 000.

Ce dont les astrophysiciens rêvent depuis des années, c'est un moyen de réaliser des analyses spectroscopiques pour des rayons X d'énergie plus élevée, pour des sources étendues, et avec un pouvoir de résolution important. Un tel instrument devrait permettre de mesurer pour la première fois en détail les mouvements (turbulence ou écoulements organisés) dans le gaz qui constitue la source de rayons X. Il ouvrira aussi de nouvelles

² On peut discerner dans le spectre ($\Delta\lambda$), soit $\lambda/\Delta\lambda$. Plus le pouvoir de résolution est élevé, plus les détails qu'on peut discerner sont petits. Dans le cas des CCDs, le pouvoir de résolution est assez limité, quelques dizaines seulement.

2 Le pouvoir de résolution spectral désigne le rapport entre la longueur d'onde de la lumière étudiée (λ) et l'étendue en longueur d'onde du plus petit détail que



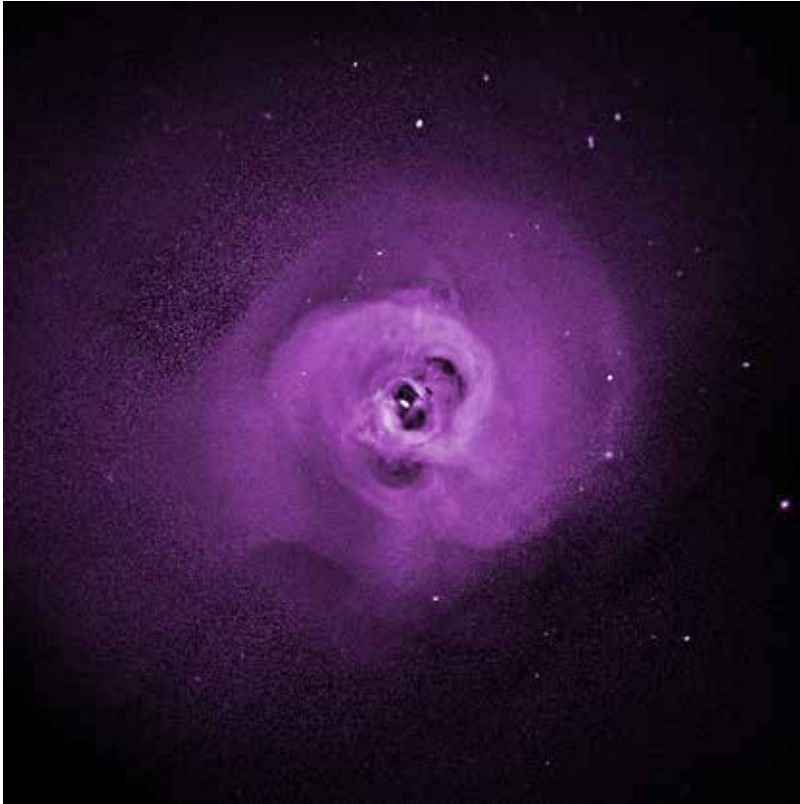
perspectives pour l'étude des trous noirs, car il permettra de connaître les conditions physiques au plus près de ceux-ci, ce qui offre un moyen inédit de tester les prédictions de la théorie de la relativité générale dans cet environnement extrême. Mais les possibilités d'un tel instrument ne se limitent pas à l'étude d'objets exotiques. Les astrophysiciens envisagent aussi de l'utiliser pour l'étude des étoiles, voire même des planètes géantes de notre propre Système solaire. En principe, un tel instrument existe : c'est un calorimètre.

Du froid pour étudier le chaud...

Alors comment fonctionnent ces calorimètres ? Schématiquement, un calorimètre est constitué d'un substrat qui absorbe les rayons X et d'un thermomètre ultra-précis. En effet, l'absorption d'un rayon X va produire une

très légère augmentation de la température du substrat et celle-ci est directement proportionnelle à l'énergie du rayon X absorbé. Autrement dit, la mesure de la variation de température nous donne la valeur de l'énergie du rayon X incident. En disposant plusieurs « pixels » d'un tel système de détection les uns à côté des autres, on peut collecter les spectres individuels de différentes régions d'une source étendue.

Toutefois, pour que cela marche, c'est-à-dire pour atteindre la précision requise sur l'énergie des rayons X, il faut travailler à des températures extrêmement basses, à seulement 0,05 degré au-dessus du zéro absolu ! C'est dire que la réalisation d'un tel instrument est un véritable défi technologique. Pour y parvenir on peut refroidir le détecteur soit à l'aide d'hélium liquide, soit de manière purement



Cette image en rayons X de l'amas de galaxies de Persée observé par Chandra montre une émission diffuse très complexe produite par le gaz intergalactique fortement influencée par les interactions avec le trou noir de la galaxie NGC1275 au centre de l'amas. (NASA/CXC/Stanford/I. Zhuravleva et al.)

du XRS, les vapeurs d'hélium après avoir refroidi le détecteur allèrent s'accumuler sur la paroi externe du cryostat, causant ainsi un réchauffement de celui-ci et donc, en retour, une évaporation plus

« mécanique ». Dans le premier cas, la durée de vie de l'instrument est forcément limitée par la capacité du réservoir d'hélium, alors que le deuxième dispositif permet en principe de s'affranchir d'une telle limitation.

La première tentative de la JAXA de lancer un calorimètre X en orbite terrestre était l'instrument XRS à bord du satellite Astro-E. Celui-ci devait être mis en orbite le 10 février 2000, mais en raison d'une défaillance du lanceur, le satellite et son calorimètre se retrouvèrent au fond du Pacifique. La JAXA mit alors les bouchées doubles pour construire Astro-E2, sorte de clone d'Astro-E. Le 10 juillet 2005, le lancement d'Astro-E2, rebaptisé Suzaku, eut lieu sans problème. Toutefois, les ennuis commencèrent quelques semaines plus tard. En raison d'une erreur de conception

importante d'hélium liquide qui à son tour allait s'accumuler là où il ne fallait pas ! Il en résulta un effet boule de neige conduisant à l'épuisement du réservoir d'hélium liquide en 10 jours au lieu des deux ans de durée de vie anticipée... et cela sans que la moindre observation scientifique ait pu être réalisée avec le XRS ! Heureusement, Suzaku comportait d'autres instruments et la mission fonctionna pendant 10 ans, jusqu'en septembre 2015, mais évidemment sans calorimètre. Lorsque la JAXA décida de se lancer avec la NASA dans la conception d'une nouvelle mission, baptisée Astro-H, il fut décidé de ne plus se fier à l'hélium liquide comme seule source de refroidissement. Le calorimètre SXS d'Astro-H comportait donc également un système

de refroidissement purement mécanique qui devait prendre le relais en cas de défaillance du système à hélium liquide. Après des années de travail minutieux, Astro-H prit son envol le 17 février 2016. Une fois dans l'espace, le satellite fut rebaptisé Hitomi. Les ingénieurs et les scientifiques commencèrent alors à préparer la phase d'utilisation du calorimètre. Le 22 février, la température d'opération du détecteur (0,05 kelvin) fut atteinte et les premières observations pouvaient commencer !

Tout bascula le 26 mars 2016. Lors d'une manœuvre de routine, le satellite se mit à tourner de manière anormale, entraînant la perte de contact avec le sol. Des images prises par des télescopes au sol révélèrent plusieurs débris qui suivaient la trajectoire d'Hitomi. La première hypothèse était celle d'une collision entre Hitomi et un débris spatial. Toutefois, après une analyse détaillée, cette hypothèse fut écartée et on se rendit compte que la rotation du satellite s'était emballée, entraînant la dislocation du satellite sans l'intervention d'un autre objet ! On comprit alors que les débris qui flottaient autour d'Hitomi n'étaient rien d'autre que ses propres panneaux solaires arrachés du corps principal du satellite. Sans ces panneaux solaires, Hitomi n'avait plus de source d'énergie et la mission était donc définitivement perdue. Cette fois-ci le calorimètre n'est pour rien dans le sort tragique de la mission. La piste la plus vraisemblable est celle de plusieurs erreurs de programmation dans le logiciel de contrôle de l'attitude du satellite...

Contrairement au cas du XRS de Suzaku, Hitomi a quand même permis d'entrevoir les capacités extraordinaires d'un calorimètre X. En effet, au moment de l'incident fatal, le SXS d'Hitomi avait terminé une première observation de l'amas de galaxies de Persée. Cette unique observation suscite un vif intérêt au sein de la communauté astrophysique. Rappelons d'abord que les amas de galaxies sont plongés dans un halo de gaz très chaud. Ce milieu intergalactique renferme autant de matière que toutes les galaxies de l'amas elles-mêmes, mais sur un volume tellement gigantesque que ce gaz est extrêmement tenu.

Toutefois, en raison de sa température de plusieurs millions de degrés, ce gaz est très brillant en rayons X. L'amas de galaxies de Persée contient en son cœur la galaxie NGC1275 qui abrite un trou noir avec une masse estimée de 340 millions de masses solaires. Ce trou noir très actif éjecte de la matière hors de la galaxie NGC1275 et alimente ainsi le milieu intergalactique. À son tour, le gaz de ce milieu retombe sur la galaxie NGC1275. Il existe donc une interaction complexe entre le gaz de l'amas de Persée et le trou noir super-massif de NGC1275. Les scientifiques s'attendaient à ce que cette combinaison entraîne des mouvements complexes au sein du gaz de l'amas. Les observations avec le SXS ont révélé des détails époustoufflants. Elles indiquent des propriétés du gaz de l'amas qui contrastent avec les attentes des scientifiques comme en témoigne un article à paraître dans la prestigieuse revue *Nature*. L'unique observation d'Hitomi n'a donc pas fini d'étonner les scientifiques !

Et l'avenir des calorimètres ? Après la perte d'Hitomi il est encore trop tôt pour dire quelle sera la réaction du côté japonais. La JAXA va-t-elle relever le pari d'une quatrième tentative ? Le timing s'avère important : si une mission japonaise avec la technologie d'Hitomi devait voler, il faudra aller vite pour ne pas entrer en compétition avec le projet Athena de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). En effet, depuis deux ans les ingénieurs européens planchent sur la conception de la mission qui devrait être mise sur orbite en 2028. Athena comportera notamment un instrument baptisé X-IFU (pour X-ray Integral Field Unit), qui est un calorimètre de nouvelle génération avec des performances qui surpasseront de loin celles du SXS. L'université de Liège et le CSL participent activement à la conception de cet instrument ambitieux au sein d'un consortium rassemblant de nombreux centres de recherche européens, US et... japonais. Le travail ne manque pas, car même si pour le commun des mortels l'année 2028 représente un futur lointain, en termes de développements technologiques c'est quasi demain !